



Original researches

The Role of Geomorphological Predictors for Modeling Spatial Variation of Environmental Regimes Measured Using Phytoindication

Received: 03 December 2018
Revised: 11 December 2018
Accepted: 12 December 2018

Oles Gonchar Dnipro National University,
Gagarin av., 72, Dnipro, 49000, Ukraine

Dnipro State Agrarian and Economic
University, Serhii Efmov Str., 25,
Dnipro, 49600, Ukraine

Tel.: +38-098-507-96-82
E-mail: zhukov_dnipro@ukr.net,
potapenkoev@dtck.com

Cite this article: Zhukov, O. V., & Potapenko, O. V. (2019). The role of geomorphological predictors for modeling spatial variation of environmental regimes measured using phytoindication. *Agrology*, 2(1), 10–21. doi: 10.32819/2617-6106.2018.14012

O. V. Zhukov¹, O. V. Potapenko²

¹Oles Gonchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

²Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Abstract. The paper established link between phytoindication estimated environmental regimes and geomorphological predictors and built environmental spatial patterns of variation modes within the Dnipropetrovsk region. 175 geobotanical descriptions were conducted in the 2016–2017 yy. within the Dnepropetrovsk region (Ukraine). Phytoindication assessment of the environmental regimes was made on the basis of the geobotanical description: soil water regime, variability of damping, soil aeration, soil acidity, total salt regime, carbonate content in soil, nitrogen content in soil, radiation balance, aridity or humidity, continentality, the rigours of the winter, light regime. The phytoindication assessments of the environmental regimes are characterized by correlation of geomorphological properties. Regression models can explain 10–31% variability of phytoindication environmental assessments modes. Most appeared to be dependent geomorphological regime nitrogen nutrition and moisture, and the least – the mode of variability of moisture and ombroclimat. Edaphic regimes for environmental information and most valuable predictor is the height of the relief and direct insolation (four statistically significant regression coefficient). For most modes of climate information and valuable factor in erosion, direct insolation and height of the channel network (two statistically significant regression coefficient). Entropy of the relief diversity is statistically significant predictor for salt regime, carbonate content and termoclimat. Digital elevation models and derivative information layers of spatial data (topographic wetness index, topographic position index, mass balance index, erosion factors, geomorphological assessment of direct and diffuse insolation, vertical distance to channel network, vector ruggedness measure, Shannon diversity of terrain) is a valuable information covariates (predictors) of the environmental regimes that obtained using the synphytoindication method. Procedure of the spatial extrapolation of the phytoindication assessments at regional level can be performed based on regression models by the method of support vectors. This approach is flexible and takes into account the specific environmental interactions in the system topography and vegetation and environmental regimes.

Keywords: digital elevation model; environmental regimes; phytoindication; landforms; spatial models.

Роль геоморфологічних предикторів для моделювання просторового варіювання екологічних режимів, оцінених за допомогою фітоіндикації

O. V. Жуков¹, O. V. Потапенко²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна

²Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

Анотація. Встановлено зв'язок між фітоіндикаційними оцінками екологічних режимів і геоморфологічними предикторами та побудовано просторові моделі варіювання екологічних режимів у межах Дніпропетровської області. У 2016–2017 рр. у межах Дніпропетровської області (Україна) проведено 175 геоботанічних описів, які стали основою для фітоіндикації екологічних режимів: зволоження едафотопу, змінність зволоження, аерація, кислотний і сольовий режими, вміст карбонатних солей, уміст у ґрунті засвоєваних форм азоту, терморезим, омброрезим, кріорезим, континентальність клімату, режим освітлення. Фітоіндикаційні оцінки екологічних режимів характеризуються кореляційним зв'язком з геоморфологічними властивостями. Регресійні моделі дозволяють пояснити 10–31% варіабельності фітоіндикаційних оцінок екологічних режимів. Найбільш геоморфологічно залежними виявилися режим вологості та азотного живлення, а найменш – режим змінності зволоження та омброклімат. Для едафічних екологічних режимів найбільш інформаційно-цінним предиктором є висота рельєфу та пряма інсоляція (по чотири статистично вірогідних регресійних коефіцієнти). Для кліматичних режимів найбільш інформаційно-цінними є фактор ерозії,

пряма інсоляція та висота над русловою мережею (по два статистично вірогідних регресійних коефіцієнти). Ентропія рельєфного різноманіття є статистично вірогідним предиктором для трюфності едафотопу, вмісту карбонатів та термоклімату. Цифрова модель рельєфу та похідні від неї інформаційні шари просторових даних (топографічний індекс вологості, індекс топографічного положення, індекс балансу геомаси, фактор ерозії, геоморфологічні оцінки прямої та розсіяної інсоляції, висота над русловою мережею, векторна міра пересіченості місцевості та різноманіття форм рельєфу за Шенноном) є інформаційно-цінними коваріатами (предикторами) екологічних режимів, які оцінені за допомогою методу синфітоіндикації. Процедура просторової екстраполяції фітоіндикаційних оцінок на регіональному рівні може бути виконана на основі регресійних моделей за методом опорних векторів. Такий підхід є гнучким та враховує специфіку екологічних взаємодій у системі рельєф–рослинний покрив–екологічний режим.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу; екологічні режими; фітоіндикація; форми рельєфу; просторові моделі.

Вступ

Рельєф являє собою сукупність різних за своєю морфологією, генезисом та віком форм і елементів земної поверхні, а також є відбиттям їх просторових відносин. Аналіз рельєфу є засобом пізнання ландшафту, ґрунтуючись на цифровій моделі рельєфу (ЦМР або в англійській транскрипції DEM – *Digital Elevation Model*). Просторовий розподіл топографічних атрибутів може бути використаний для непрямого виміру просторової мінливості гідрологічних, геоморфологічних і біологічних процесів (Moore, Norton, et al., 1993). Важливими параметрами рельєфу є форми рельєфу (*landforms*), або одиниці рельєфу, кожна з яких несе інформацію про фізичні, хімічні й біологічні процеси та параметри (Dehn et al., 2001). Тому визначення ролі рельєфу як фактора просторової організації екологічних режимів є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Топографічні індекси по-різному впливають на продуктивність екосистем, що визначається ґрунтовими та кліматичними умовами (Kravchenko & Bullock, 2000). Позиція в межах ландшафту (вигнена або ввігнена ділянка, схил або тальвег) є суттєвим фактором, який впливає на врожайність пшениці (Cihra, 1984). Кривизна поверхні рельєфу характеризується ефективним параметром для описання взаємовідносин між урожайністю, топографією та погодними умовами (Timlin et al., 1998). Одним з найважливіших ґрунтових та ландшафтних факторів, які впливають на продуктивність агроєкосистем, вважають відносну висоту рельєфу (Cox et al., 2006; Miao et al., 2006).

Середня врожайність та середня вологість зерна значно залежать від довжини стоку поверхні поля в умовах іригації (Marques da Silva & Silva, 2006). Довжина схилу до водорозділу є найкращим топографічним індикатором урожайності пшениці у широкому діапазоні масштабів. Топографічний індекс вологості дозволив пояснити від 38 до 48% просторової варіації врожайності пшениці у східному Колорадо (США) в 1997 р. (Green & Erskine, 2004).

Вплив топографічних індексів на продуктивність екосистем залежить від погодних умов, особливо від опадів. У семиаридних та аридних регіонах, де потенціал випаровування значно більший, ніж кількість опадів, уміст води в ґрунті є лімітуючим фактором для продукції зерна (Chi et al., 2009).

Вплив опадів (снігопадів або дощів) на врожайність може бути підсилений унаслідок взаємодії з рельєфними особливостями та ґрунтовими властивостями (Timlin et al., 1998; Kaspar et al., 2004). Слід відзначити, що відомості з літератури про характер взаємовідносин між погодними умовами, топографією та продуктивністю є вкрай суперечливими (Kravchenko & Bullock, 2000).

Було встановлено, що топографічні особливості менше впливають на врожай у сухі роки, ніж у вологі (Halvorson & Doll, 1991). Іншими дослідженнями стверджується, що вплив топографії більш відчутливий у вологі роки, ніж у сухі (Simmons et al., 1989). Ці суперечливості можна пояснити відмінностями ґрунтових та кліматичних умов, у яких були виконані експерименти. Умови вологості ґрунту є найважливішим фактором, який контролює варіабельність урожайно-

сті пшениці та впливає на значимість топографічних індексів у семиаридних регіонах. У сухі роки довжина до водорозділу була найсуттєвішим фактором, який визначав урожайність. У вологі роки значення топографічних показників було меншим (Chi et al., 2009). Показана роль геоморфологічних екогеографічних змінних, які одержані за допомогою цифрової моделі рельєфу, створеної на основі даних дистанційного зондування Землі, як маркери екологічної ніши бур'янів на прикладі ваточника сирійського (*Asclepias syriaca* L.) (Kunah & Papka, 2016b).

За допомогою застосування ENFA-аналізу оцінена роль рельєфу як фактора, що визначає просторове розміщення лебедя-шипуну (*Cygnus olor*) (Gmelin, 1803) на зимівлі в умовах затоки Сиваш (Andrushenko & Zhukov, 2016). Встановлена регресійна залежність електричної провідності ґрунту від висоти рельєфу та її похідних, вегетаційних індексів Landsat, рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву (Zhukov, Kunah, Novikova, et al., 2016).

Фітоіндикаційні шкали Дідуха індикують конкретні екологічні фактори, які представлені у вимірюваних одиницях. Наприклад, показник гігроморф дозволяє індикувати продуктивну вологу ґрунту за період вегетації, показник змінності зволоження індикуює коефіцієнт нерівномірності зволоження, кислотний режим рН (Didukh, 2011). Розроблені підходи для застосування катенарного методу вивчення різноманіття тваринного населення ґрунтів аренного ландшафту долини р. Дніпро в межах природного заповідника “Дніпровсько-Орільський” за допомогою фітоіндикаційного оцінювання основних трендів мінливості екологічних умов (Zhukov, Kunah, Taran, et al., 2016).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для оцінки просторової мінливості екологічних режимів необхідним є збір даних значних об'ємів. Для вирішення цього завдання фітоіндикаційне оцінювання буде досить ефективним. Для інтерполяції просторових даних найбільш часто застосовують кригінг (McBratney et al., 2003), але цей підхід потребує виконання умови стаціонарності досліджуваного процесу. Як правило, виконання такої вимоги можна досягти на просторовому рівні окремого біогеоценозу або ландшафту (Baljuk et al., 2014). Для інтерполяції одержаних точкових оцінок екологічних режимів у межах невиконання умови стаціонарності необхідне обґрунтування альтернативних підходів.

Мета нашої роботи полягала в тому, щоб встановити зв'язок між фітоіндикаційними оцінками екологічних режимів і геоморфологічними предикторами та застосувати цей зв'язок для побудови просторових моделей варіювання екологічних режимів у межах Дніпропетровської області.

Матеріал і методи досліджень

Об'єкти електричних мереж, у тому числі електричні підстанції, розташовані по всій території Дніпропетровської області. Розгалуженість структури обумовлює взаємодію з навколишнім середовищем. Важливим аспектом екологічної оцінки території електричних підстанцій є визначення їх ролі як локальних рефугіумів біологічного різноманіття. Ці території являють собою режимні об'єкти, які значною мірою екрановані

від цілого переліку зовнішніх впливів. Їх можна розглядати як елементи територіальної мозаїчності, які формують осередки, що зазнають меншого агротехнічного впливу (Potapenko, 2016). У 2016–2017 рр. у межах Дніпропетровської області (Україна) на територіях 74 електричних підстанцій було проведено 175 геоботанічних описів (Zhukov, Potapenko, 2017; Potapenko, 2018). Геоботанічні описи стали основою для фітоіндикації екологічних режимів. Я. П. Дідух виділяє едафічні та кліматичні фітоіндикаційні шкали (Didukh, 2011). До едафічних належать показник гідроморф (*Hd*), змінність зволоження (*fH*), аерація (*Ae*), кислотний режим (*Rc*), сольовий режим (*Sl*), уміст карбонатних солей (*Ca*), уміст у ґрунті засвоюваних форм азоту (*Nt*). До кліматичних належать шкали за чотирма факторами: терморезим (*Tm*), омброрезим (*Om*), кріорезим (*Cr*) і континентальність клімату (*Kn*). Крім зазначених, виділяється ще шкала освітлення (*Lc*), яку можна охарактеризувати як мікрокліматичну шкалу. Можна припустити, що едафічні шкали та шкала освітлення будуть чутливі до варіабельності властивостей ґрунту на рівні окремої точки, що може бути основою для застосування фітоіндикаційних шкал для великомасштабного картографування. Теплові властивості ґрунтів індикуються шкалою терморезиму, а гідротермічні – шкалою омброрезиму (Didukh, 2011). Фітоіндикаційні шкали наведені за Я. П. Дідухом (Didukh, 2011), фітоіндикаційна оцінка градацій екологічних факторів – за Г. Н. Бузуком (Buzuk, 2017).

В основу створення цифрової моделі рельєфу покладено дані, представлені ресурсом HydroSHEDS (Lehner et al., 2006). Роздільна здатність шару даних становила 15 арксекунд. Векторний файл з контуром Дніпропетровської області був одержаний з ресурсу DIVA-GIS (<http://diva-gis.org>). Як предиктор екологічних факторів, оцінених на основі фітоіндикації, був застосований перелік похідних від цифрової моделі рельєфу шарів даних.

Топографічний індекс вологості. Концепція топографічного індексу вологості (*Topographic wetness index* – TWI) уперше була запропонована К. Бівенном та Н. Кіркбі (Beven & Kirkby, 1979). Топографічний індекс вологості обчислюється за формулою

$$TWI = \ln(a/\tan\beta),$$

де *a* – дренажна площа (площа водозбору, розрахована на одиницю довжини замикаючого контуру); β – крутість схилу (Moore, Gessler, et al., 1993; Kunah & Papka, 2016a; Zhukov & Andryushchenko, 2017).

Індекс топографічного положення (*Topographic position index* – TPI) являє собою різницю між абсолютною висотою даної точки в просторі та середньою висотою точок у певному буфері навколо вихідної точки. Позитивні значення TPI відповідають опуклостям земної поверхні; негативні – зниженням; значення, близькі до нуля, можуть указувати як на рівнинну поверхню, так і середню частину схилу (Guisan et al., 1999).

Індекс балансу геомаси (*Mass Balance Index*) розкриває топографічні передумови до руйнування та перевідкладання ґрунтів. Даний показник дозволяє виявити ділянки з високим ступенем імовірності розвитку осипних схилових процесів (Moeller et al., 2008). Від'ємні значення індексу вказують на ділянки з нагромадженням геомаси, такі як депресії рельєфу або заплави річок. Позитивні значення вказують на ділянки з високим ступенем ризику ерозійних процесів. Значення індексу, близьке до нуля, свідчить про ділянки з рівновагою утрату та прибутку геомаси (Kunah & Papka, 2016b).

Фактор ерозії LS. Ерозійний потенціал рельєфу LS є одним з компонентів універсального рівняння ґрунтової ерозії (*Universal Soil Loss Equation* – USLE). LS є добутком *L*- і *S*-факторів. *L*-фактор розкриває значення довжини схилу (*slope length*), а *S*-фактор – крутість схилу (*slope steepness*). Універсальне рівняння ерозійних втрат ґрунту (USLE), або рівняння Уїшмейєра-Сміта, встановлене в США як метод розрахунків середньорічних втрат ґрунту на основі узагальнення результатів

спостережень на стандартних стокових майданчиках довжиною 22,13 м та з ухилом 9%, проведених більш ніж на 8000 ділянках у 21 штаті (Kunah & Papka, 2016b). У першій редакції USLE для опису впливу крутості схилу використовували тангенс, а для показника ступеня за довжини схилу – постійну величину, що дорівнює 0,5. Пізніше тангенс кута нахилу поверхні замінили на синус, оскільки було встановлено, що з допомогою цієї функції вдається більш точно відбити вплив ухилу на схилах крутістю понад 3° (Wischmeier & Smith, 1978). Ерозійні втрати ґрунту набагато більш чутливі до зміни крутості схилів, ніж до зміни довжини, тому вдосконалена модель USLE–RUSLE була спрямована на найбільш точну оцінку фактора крутості схилів (McCool et al., 1994).

Пряма та розсіяна інсоляція належать до категорії топокліматичних показників (Boehner & Antonic, 2009). Найбільш помітні варіації кліматичних паттернів виникають через топокліматичні процеси, що відбуваються в прикордонному шарі Землі, які мають характеристичну розмірність не більше ніж 10^1 км (мезо β -масштаб) і до 10^{-3} км (мікро β -масштаб). Масштабні рівні наведено за Orlanski (1975). Топокліматологія є частиною кліматології, яка займається вивченням впливу земної поверхні на клімат. Земна поверхня переважно контролює просторову диференціацію приземних атмосферних процесів і пов'язаних із цим кліматичних варіацій (Boehner & Antonic, 2009). Сонячна радіація, що потрапляє на земну поверхню, має дві складові – короткохвильову та довгохвильову. Для обчислення короткохвильової складової необхідно враховувати оцінку прямої і дифузійної компонент, які попадають на відкрити поверхню з оцінкою всіх ефектів, викликаних топографією поверхні та специфічних для кожної компоненти (Boehner & Antonic, 2009).

Висота над русловою мережею (*Altitude above channel network*), або вертикальна дистанція до руслової мережі (*Vertical Distance to Channel Network* – VDTCN), є різницею між висотою рельєфу та висотою руслової мережі (Olaya & Conrad, 2008). Є надійним маркером рівня ґрунтових вод і може бути використаний для картографії ґрунтів (Bock & Köthe, 2008).

Векторна міра пересіченості місцевості (*Vector Ruggedness Measure* – VRM) оцінює дисперсію ортогональних до поверхні рельєфу векторів. Значення VRM низьке як для плоскої місцевості, так і для крутої місцевості, але високе для крутої та пересіченої (Sappington et al., 2007). Пересіченість розуміється як негладкість поверхні (Kunah & Papka, 2016b).

На основі цифрової моделі рельєфу виконали процедуру класифікації форм рельєфу за Івахаші та Пайком (Iwahashi & Pike, 2007). Було виділено 16 форм рельєфу: пологий схил, груба текстура, мала опуклість (*gentle slope, coarse texture, low convexity*), пологий схил, тонка текстура, мала опуклість (*gentle slope, fine texture, low convexity*), пологий схил, груба текстура, значна опуклість (*gentle slope, coarse texture, high convexity*), пологий схил, тонка текстура, значна опуклість (*gentle slope, fine texture, high convexity*), помірно крутий схил, груба текстура, мала опуклість (*moderate slope, coarse texture, low convexity*), помірно крутий схил, тонка текстура, мала опуклість (*moderate slope, fine texture, low convexity*), помірно крутий схил, груба текстура, значна опуклість (*moderate slope, coarse texture, high convexity*), помірно крутий схил, тонка текстура, значна опуклість (*moderate slope, fine texture, high convexity*), крутий схил, груба текстура, мала опуклість (*steep slope, coarse texture, low convexity*), крутий схил, тонка текстура, мала опуклість (*steep slope, fine texture, low convexity*), крутий схил, груба текстура, значна опуклість (*steep slope, coarse texture, high convexity*), крутий схил, тонка текстура, значна опуклість (*steep slope, fine texture, high convexity*), дуже крутий схил, груба текстура, мала опуклість (*very steep slope, coarse texture, low convexity*), дуже крутий схил, тонка текстура, мала опуклість (*very steep slope, fine texture, low convexity*), дуже крутий схил, груба текстура, значна опуклість (*very steep slope, coarse texture, high*

convexity), дуже крутий схил, тонка текстура, значна опуклість (*very steep slope, fine texture, high convexity*). Після класифікації форм була обчислена ентропія різноманіття форм рельєфу за Шенноном з вікном пропускання 3 пікселі.

Географічна база даних була підготовлена в ArcMap 10.4.1. Розрахунки геоморфологічних шарів здійснені в програмі Saga-GIS (Olaya & Conrad, 2008). Регресійний аналіз та екстраполяцію оцінених у рамках регресійної моделі значень на територію області виконано в середовищі статистичних розрахунків R (R Core Team, 2017) зі застосуванням бібліотеки *kernelab* (Karatzoglou et al., 2004).

Результати та обговорення

За фітоіндикаційним оцінюванням рівень вологості едафотопу варіює в межах від 8,77 до 20,48 (табл. 1), що відповідає умовам, які сприятливі від субксерофітів до субгідрофітів (Didukh, 2011). Найбільш типовими умовами є такі, що сприятливі для гідромезофітів. Аналіз гістограми розподілу екологічних факторів указує на гетерогенність вибірки (рис. 1). Цей висновок також підтверджується значеннями асиметрії (позитивне значення – зсув розподілу вліво) та ексцесу (від’ємне значення – бімодальний розподіл). Відповідно, переважними режимами є такі, що сприятливі для гідромезофітів, гідрофітів та субгідрофітів.

Режим контрастності умов зволоження знаходиться в діапазоні від гемігідроконтрастофобів до гідроконтрастофілів. Найбільш типовими умовами є такі, що сприятливі для гемігідроконтрастофілів. Аналіз гістограми розподілу екологічних факторів указує на гетерогенність вибірки. Цей висновок також підтверджується значеннями асиметрії (позитивне значення вказує на зсув розподілу вліво) та ексцесу (від’ємне значення вказує на бімодальний розподіл). Переважними режимами є такі, що сприятливі для гемігідроконтрастофобів та гідроконтрастофілів. Статистичний розподіл фітоіндикаційних оцінок кислотності наближений до нормального. Найбільш типовими є умови, які сприятливі для субацидофілів, хоч умови кислотності варіюють від сприятливих для ацидофілів до суббазофілів.

Оцінки режиму трофності розподілені симетрично. Найбільш типовими є умови, які сприятливі для евтрофів. Режим трофності варіює від семіоліготрофних до глікотрофних умов. Уміст карбонатів у ґрунті створює найбільш сприятливі умови для гемікарбонатофілів. В аспекті фітоіндикаційних оцінок засвоєваних форм азоту досліджена вибірка є гетерогенною і являє собою суміш нормальних розподілів. Найбільш типови-

ми є режими, які сприятливі для гемінітрофілів та еунітрофілів.

Режим ґрунтового повітря створює сприятливі умови для геміаерофобів. Загалом умови аерації ґрунтового середовища варіюють від субаерофільних до субаерофобних (рис. 2).

Рослинні угруповання індикують терморезим, який відповідає енергетичному балансу $2110,1 \text{ мДж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рік}^{-1}$. Ця оцінка варіює в межах від 1567,9 до 2706,6 $\text{мДж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рік}^{-1}$. Розподіл фітоіндикаційної оцінки терморезиму є симетричним та наближеним до нормального закону розподілу.

Омброклімат кількісно характеризується співвідношенням між кількістю опадів та випаровуванням. За фітоіндикаційними оцінками можна встановити, що цей показник дорівнює $-193,2 \text{ мм}$, що відповідає субаридофітним умовам. Оцінка омброклімату варіює в межах від $-603,1$ (мезоаридофітні умови) до $+242,3 \text{ мм}$ (субомброфітні умови).

За фітоіндикаційними оцінками клімат регіону можна оцінити як субконтинентальний з варіюванням від геміокеанічного до континентального. Кріоклімат кількісно характеризується температурою найхолоднішого місяця року. Фітоіндикаційні оцінки цього показника характеризуються асиметричним розподілом із зсувом управо. Найбільш типова оцінка кріоклімату становить $-7,53 \text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає помірним/м’яким зимами. Діапазон варіювання оцінок кріоклімату становить від $-19,02$ до $+3,16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Переважає більшість сайтів, де проведені геоботанічні описи, характеризується найбільшим рівнем освітлення, який сприятливий для геоліофітів. Але діапазон рівнів освітлення варіює від сціофітних до геліофітних умов.

Висота рельєфу в межах Дніпропетровської області варіює від 51 до 211 м (рис. 3). Найбільш типові висоти знаходяться в діапазоні 65–155 м. Середнє значення висоти рельєфу становить 109 м. Діапазон висот, зі зробленими геоботанічними описами – 51–179 м, у середньому – 88,9 м. Цифрова модель рельєфу є основою для розрахунку похідних інформаційних шарів, які викривають різні аспекти поверхні Землі як фактора перерозподілу кліматичних умов. Геоморфологічним маркером вологості ґрунту є топографічний індекс вологості (TWI), який в Дніпропетровській області варіює в межах 6,9–25,1, у середньому становить 11,8. У точках з проведеним геоботанічним описом рослинності значення TWI варіює в межах 8,5–21,6 (у середньому – 12,5).

Форми поверхні в межах області варіюють від опуклих (індекс топографічного положення TPI позитивний, приймає значення до 4,27) до увігнутих знижень (TPI від’ємний, приймає значення до $-4,3$). Закономірно, що в середньому цей показник

Таблиця 1. Описові статистики варіювання фітоіндикаційних оцінок екологічних факторів

Фітоіндикаційна шкала	Середнє \pm ст. помилка	Мінімум	Максимум	Асиметрія \pm ст. помилка	Ексцес \pm ст. помилка	CV, %
Hd	14,18 \pm 0,19	8,77	20,48	0,34 \pm 0,18	-0,49 \pm 0,36	17,83
fH	7,53 \pm 0,08	5,24	10,18	0,31 \pm 0,18	-0,41 \pm 0,36	13,60
Rc	7,80 \pm 0,09	5,31	10,98	-0,08 \pm 0,18	-0,28 \pm 0,36	14,58
Sl	9,13 \pm 0,16	4,02	14,73	-0,04 \pm 0,18	-0,32 \pm 0,36	23,25
Ca	8,83 \pm 0,12	4,84	12,32	-0,15 \pm 0,18	-0,30 \pm 0,36	17,95
Nt	7,68 \pm 0,16	2,60	12,65	-0,26 \pm 0,18	-0,55 \pm 0,36	28,38
Ae	7,60 \pm 0,04	6,28	9,10	0,11 \pm 0,18	-0,42 \pm 0,36	7,29
Tm	10,08 \pm 0,08	7,49	12,91	0,10 \pm 0,18	-0,20 \pm 0,36	10,06
Om	11,95 \pm 0,07	9,86	14,17	-0,02 \pm 0,18	-0,54 \pm 0,36	8,22
Kp	9,59 \pm 0,12	5,58	13,45	-0,04 \pm 0,18	-0,42 \pm 0,36	17,22
Cr	8,00 \pm 0,08	5,00	10,79	-0,31 \pm 0,18	0,04 \pm 0,36	13,79
Lc	7,03 \pm 0,15	1,89	9,00	-0,64 \pm 0,18	-0,68 \pm 0,36	28,65

Умовні позначки: Hd – режим вологості едафотопу; fH – режим змінності вологості; Rc – режим кислотності; Sl – режим трофності; Ca – вміст карбонатів у ґрунті; Nt – поживні форми азоту; Ae – режим аерації; Tm – термоклімат; Om – омброклімат; Kp – континентальність; Cr – кріоклімат; Lc – режим освітлення.

наближений до нуля (0,02). Геоботанічні описи розміщені в межах дещо меншого діапазону умов рельєфу (ТРІ від -2,0 до +2,9, у середньому 0,2). Переважна більшість пікселів характеризується значеннями індексу балансу геомаси (МВІ) у межах

від -0,029 до +0,036. Точки геоботанічних описів характеризуються значеннями МВІ від -0,014 до +0,036.

Переважає більшість ділянок області має незначні рівні маркера активності ерозійних процесів LS, хоча цей показник

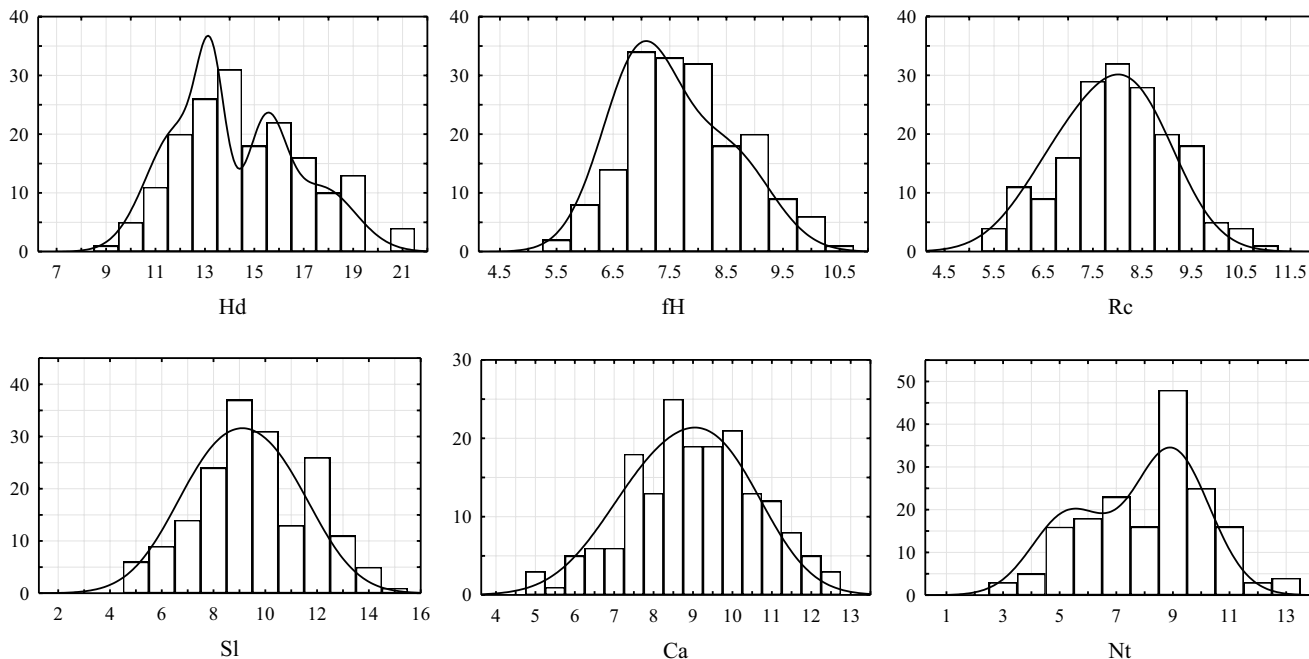


Рис. 1. Статистичні розподіли фітоіндикаційних оцінок екологічних факторів
Умовні позначки: Hd – режим вологості едафотопу; fH – режим змінності вологості; Rc – режим кислотності; Sl – режим трюфності; Ca – вміст карбонатів у ґрунті; Nt – засвоєвані форми азоту.

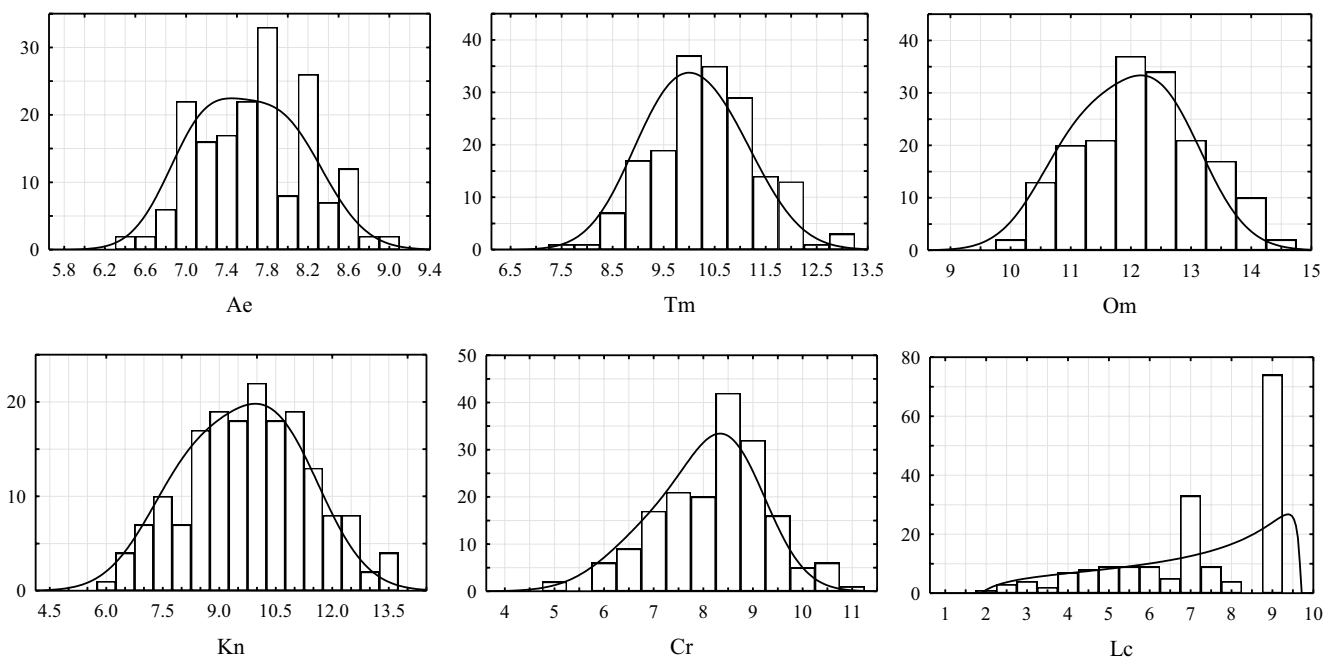


Рис. 2. Статистичні розподіли фітоіндикаційних оцінок екологічних факторів
Умовні позначки: Ae – режим аерації; Tm – термоклімат; Om – омброклімат; Kn – континентальність; Cr – криоклімат; Lc – режим освітлення.

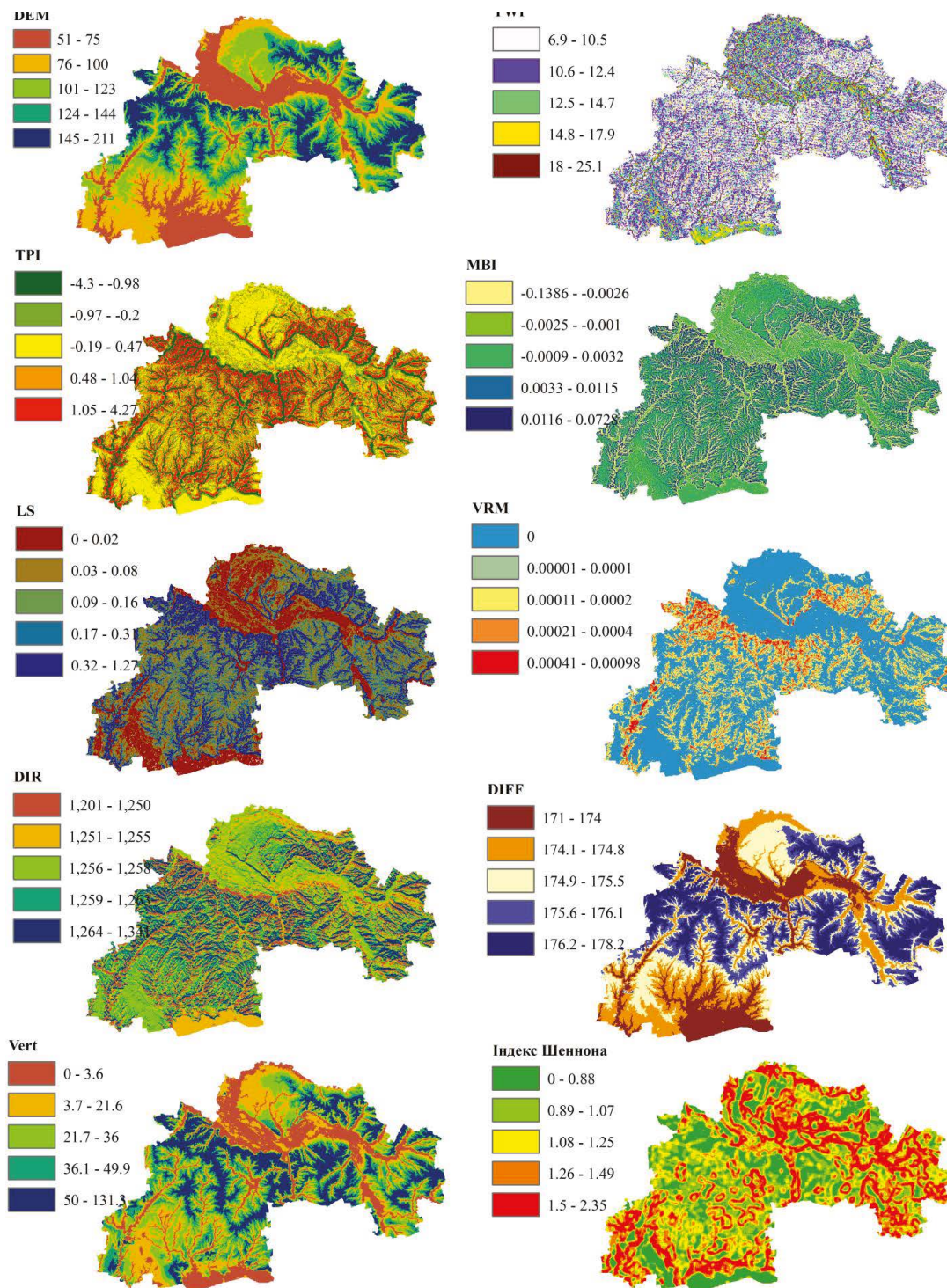


Рис. 3. Просторове варіювання предикторів фітоіндикаційних оцінок екологічних режимів у межах Дніпропетровської області

Умовні позначки: DEM – висота рельєфу; TWI – топографічний індекс вологості;

TPI – індекс топографічного положення; MBI – індекс балансу геомаси; LS – фактор ерозії;

VRM – векторна міра пересіченості місцевості; DIR – пряма інсоляція; DIFF – розсіяна інсоляція;

VERT – висота над русловою мережею; Індекс Шеннона – ентропія різноманіття форм рельєфу.

може сягати значення 1,27. Для 95% геоботанічних описів значення фактора ерозії LS не перевищують 0,49. Векторна міра пересіченості місцевості (VRM) варіює від 0 до $9,8 \cdot 10^{-4}$.

Пряма інсоляція за період з 1 квітня по 31 жовтня в межах Дніпропетровської області становить 1201–1341 (у середньому

– 1254) кВт·год/м². Розсіяна інсоляція за той самий період становить 171–178 (у середньому 174,9) кВт·год/м². Рівень прямої інсоляції у місяцях розміщення геоботанічних описів становить 1233–1270 (у середньому – 1255) кВт·год/м², а розсіяної – 173–177 (у середньому 174,6) кВт·год/м².

Висота над русловою мережею варіює в межах від 0 до 131 м, у середньому – 29,2 м. Геоботанічні описи розміщені в місцеперебуваннях, де висота над русловою мережею не перевищує 85,1 м (у середньому – 18,9 м).

За процедурою Івахаші та Пайка (Iwahashi & Pike, 2007) було виділено 16 типів поверхні Землі (рис. 4). Кожен з цих типів займає від 1,5 до 21,9% поверхні. Найменшу частку поверхні займає тип “помірно крутий схил, груба текстура, значна опуклість”, а найбільшу – типи “крутий схил, тонка текстура,

значна опуклість” та “дуже крутий схил, тонка текстура, значна опуклість”. Ентропія різноманіття форм рельєфу за Шенноном варіює в межах від 0 до 2,35 (у середньому – 1,16) біт/піксель. Геоботанічні описи зроблені в місцевостях, де різноманіття варіює від 0,72 до 2,04 (у середньому 1,28) біт/піксель.

Фітоіндикаційні оцінки екологічних режимів характеризуються кореляційним зв'язком з геоморфологічними властивостями (табл. 2). Режим зволоження описується статистично вірогідною від'ємною кореляцією з індексом топографічного

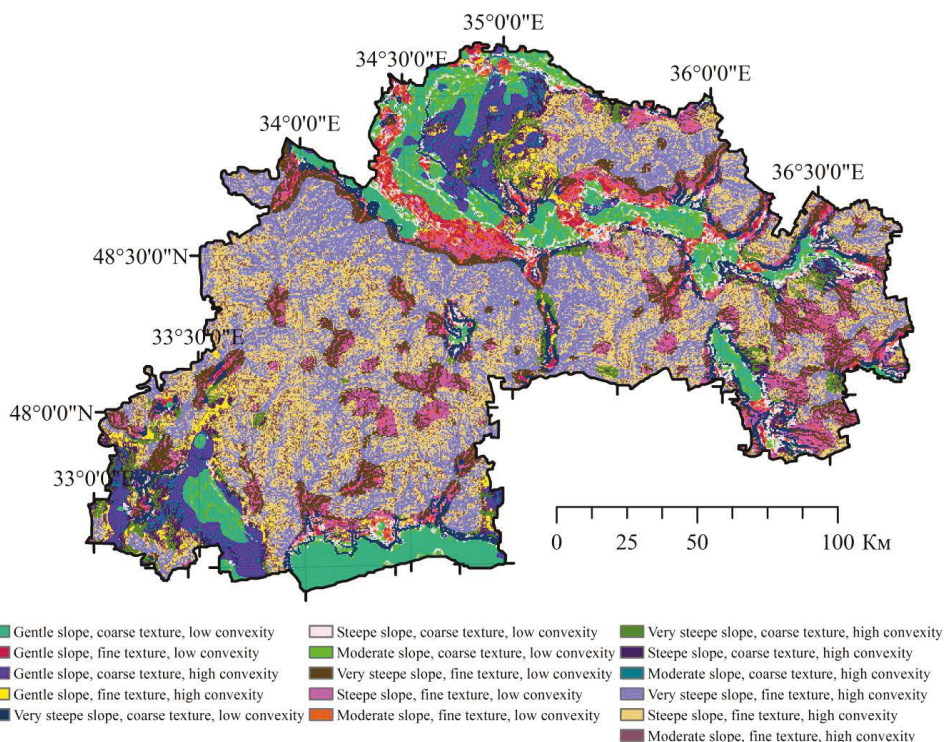


Рис. 4. Класифікація типів Земної поверхні в межах Дніпропетровської області за Івахаші та Пайком (Iwahashi & Pike, 2007)

Таблиця 2. Кореляційна матриця фітоіндикаційних шкал та геоморфологічних предикторів (представлені коефіцієнти кореляції Спірмена для $p < 0.05$, $N = 177$)

Фітоіндикаційна шкала	Геоморфологічні предиктори									
	DEM	TWI	TPI	MBI	LS	VRM	DIR	DIFF	VERT	Shannon
Hd	-	-	-0,25	-	-	0,27	-	-	-	-
fH	0,17	-0,16	-	-	-	-	-0,23	0,18	-	-
Rc	-	-	-	-	-	-0,18	-	-	-	-
Sl	-	-0,20	-	-	-	-	-	0,15	-	0,23
Ca	-	-	-	-	0,16	-	-	-	0,29	-
Nt	0,29	-	-0,23	-0,27	-	-0,22	-0,28	0,29	-	-
Ae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tm	-	-	-0,18	-	-	0,18	-	-	-0,16	0,21
Om	-	-	-	-	-	-	0,24	-	-	-
Kp	-	-	-	-	-	-	-	0,19	0,39	-
Cr	-	-	-	-	0,24	0,17	-	-	-	-
Lc	-0,16	-	-	-	-	-	-	-0,15	-	-

Умовні позначки: Hd – режим вологості едафотопу; fH – режим змінності вологості; Rc – режим кислотності; Sl – режим трофності; Ca – вміст карбонатів у ґрунті; Nt – поживні форми азоту; Ae – режим аерації; Tm – термоклімат; Om – омброклімат; Kp – континентальність; Cr – кріоклімат; Lc – режим освітлення; DEM – висота рельєфу; TWI – топографічний індекс вологості; TPI – індекс топографічного положення; MBI – індекс балансу геомаси; LS – фактор ерозії; VRM – векторна міра пересіченості місцевості; DIR – пряма інсоляція; DIFF – розсіяна інсоляція; VERT – висота над русловою мережею; Shannon – ентропія різноманіття форм рельєфу.

положення та позитивно – з векторною мірою пересіченості місцевості. Змінність зволоження корелює з чотирма геоморфологічними предикторами. Цей екологічний режим позитивно корелює з висотою рельєфу, дифузною інсоляцією, від'ємно – з топографічним індексом вологості та прямою інсоляцією. Кислотність едафотопу в межах Дніпропетровської області статистично вірогідно корелює з векторною мірою пересіченості місцевості. Трофність едафотопу пов'язана з варіюванням топографічного індексу вологості, дифузною інсоляцією та ентропією форм рельєфу. Висока карбонатність ґрунтів корелює з більшими ризиками ерозії, які характеризуються фактором ерозії та висотою руслової мережі. Просторово це відповідає еродованим ділянкам у верхніх частинах схилів балок, де спостерігається скипання від обробки соляною кислотою з поверхні ґрунту.

Режим азотного живлення дуже чутливий до геоморфологічних особливостей місцевості, що виражається в кореляційному зв'язку цього показника з шістьма геоморфологічними предикторами. Очевидно, що найбільш сприятливі умови азотного живлення формуються на плакорних ділянках, що під-

тверджується позитивною кореляцією фітоіндикаційної оцінки поживних форм азоту та висоти рельєфу.

Одержані експериментальні результати не дозволили встановити статистично вірогідних попарних кореляційних зв'язків між режимом аерації та геоморфологічними предикторами. Серед кліматичних шкал найбільшою мірою геоморфологічно детерміноване варіювання термоклімату (кореляція з чотирма геоморфологічними предикторами), а найменшою – варіювання омброклімату (кореляція з одним предиктором).

Можна припустити, що зв'язок між фітоіндикаційними оцінками екологічних режимів та геоморфологічними предикторами має більш складний характер, ніж це кількісно охарактеризовано попарними коефіцієнтами кореляції. Для перевірки цієї гіпотези нами застосований множинний регресійний аналіз, де як залежна змінна розглядаються фітоіндикаційні оцінки, а як предиктори – сукупність геоморфологічних показників (табл. 3, 4).

Регресійні моделі дозволяють пояснити 10–31 % варіабельності фітоіндикаційних оцінок екологічних режимів. Найбільш геоморфологічно залежними виявились режим вологості та азотного живлення, а найменш – режим змінності зволоження та омброклімат.

Таблиця 3. Лінійна регресійна залежність фітоіндикаційних оцінок едафічних режимів від геоморфологічних предикторів (напівжирним показані статистично вірогідні коефіцієнти для $p < 0.05$)

Предиктор*	Фітоіндикаційні оцінки*						
	Hd	fH	Rc	SI	Ca	Nt	Ae
DEM	-5,79±2,13	-1,72±2,43	7,64±2,32	1,19±2,38	-2,51±2,36	4,96±2,12	-5,09±2,37
TWI	-0,11±0,09	-0,15±0,10	0,35±0,09	-0,16±0,10	-0,04±0,10	-0,11±0,09	0,07±0,10
TPI	-0,54±0,11	0,07±0,13	0,22±0,12	0,01±0,12	-0,05±0,12	-0,08±0,11	-0,19±0,12
MBI	0,22±0,12	-0,03±0,13	0,14±0,13	0,00±0,13	-0,06±0,13	-0,35±0,11	0,24±0,13
LS	0,09±0,09	0,01±0,10	-0,02±0,09	-0,13±0,10	0,00±0,10	0,13±0,09	0,34±0,10
VRM	0,29±0,09	-0,07±0,10	-0,30±0,10	0,05±0,10	0,19±0,10	-0,19±0,09	-0,06±0,10
DIR	0,15±0,07	-0,21±0,08	-0,12±0,08	0,07±0,08	-0,09±0,08	-0,16±0,07	0,16±0,08
DIFF	5,82±2,12	1,82±2,43	-7,56±2,31	-0,91±2,37	2,25±2,36	-4,56±2,12	5,07±2,36
VERT	-0,11±0,11	-0,05±0,12	0,00±0,12	-0,17±0,12	0,48±0,12	-0,12±0,11	-0,03±0,12
Shannon	-0,04±0,07	-0,01±0,08	0,00±0,08	0,31±0,08	-0,19±0,08	-0,06±0,07	0,11±0,08
R ²	0,31	0,10	0,18	0,14	0,15	0,31	0,15

* Умовні позначки: див. табл. 2.

Таблиця 4. Лінійна регресійна залежність фітоіндикаційних оцінок кліматичних режимів від геоморфологічних предикторів (напівжирним показані статистично вірогідні коефіцієнти для $p < 0.05$)

Предиктор	Фітоіндикаційні оцінки				
	Tm	Om	Kn	Cr	Lc
DEM	0,35±2,36	-3,87±2,42	-1,28±2,25	1,27±2,37	-3,92±2,23
TWI	-0,09±0,10	-0,05±0,10	-0,02±0,09	-0,12±0,10	0,02±0,09
TPI	-0,38±0,12	0,16±0,13	-0,06±0,12	0,01±0,12	0,10±0,12
MBI	0,18±0,13	-0,10±0,13	-0,08±0,12	-0,16±0,13	-0,05±0,12
LS	-0,05±0,10	0,08±0,10	-0,20±0,09	0,27±0,10	-0,16±0,09
VRM	0,18±0,10	0,10±0,10	0,18±0,09	0,11±0,10	0,19±0,09
DIR	0,09±0,08	0,26±0,08	-0,17±0,08	0,04±0,08	-0,05±0,08
DIFF	-0,28±2,36	3,83±2,42	1,06±2,25	-1,08±2,37	3,38±2,22
VERT	-0,10±0,12	-0,08±0,12	0,65±0,11	-0,15±0,12	0,57±0,11
Shannon	0,25±0,08	0,02±0,08	0,10±0,08	-0,04±0,08	0,13±0,08
R ²	0,15	0,10	0,22	0,14	0,24

Умовні позначки: Tm – термоклімат; Om – омброклімат; Kn – континентальність; Cr – кріоклімат; Lc – режим освітлення; DEM – висота рельєфу; TWI – топографічний індекс вологості; TPI – індекс топографічного положення; MBI – індекс балансу геомаси; LS – фактор ерозії; VRM – векторна міра пересіченості місцевості; DIR – пряма інсоляція; DIFF – розсіяна інсоляція; VERT – висота над русловою мережею; Shannon – ентропія різноманіття форм рельєфу.

Для едафічних екологічних режимів найбільш інформаційно-цінним предиктором є висота рельєфу та пряма інсоляція (по чотири статистично вірогідних регресійних коефіцієнти). Для кліматичних режимів найбільш інформаційно-цінними є фактор ерозії, пряма інсоляція та висота над русловою мережею (по два статистично вірогідних регресійних коефіцієнти). Ентропія рельєфного різноманіття є статистично вірогідним предиктором для трофності едафотопу, вмісту карбонатів та термоклімату.

Лінійні регресійні моделі, які встановлюють зв'язок між фітоіндикаційними оцінками екологічних режимів та геоморфологічними предикторами, характеризуються певною пояснювальною здатністю. Лінійна модель дозволяє досить наочно інтерпретувати встановлені зв'язки. Деякі зв'язки є очевидними та певною мірою – тривіальними. Так, регресійна модель вказує: чим більше висота рельєфу, тим менше рівень зволоження, що є досить очікуваним. Деякі зв'язки демонструють більш тонкі взаємодії між рельєфом, рослинним покривом та екологічними режимами. Особливий інтерес являє зв'язок такої синтетичної властивості рельєфу, як різноманіття елементів рельєфу та фітоіндикаційних оцінок трофності, вмісту карбонатів та терморегіму. Це свідчить про те, що не тільки локальні умови, але й просторовий контекст впливає на перебіг екологічних процесів, що визначають відповідні режими.

Встановленим регресійним залежностям тільки в деяких випадках можна надати значення маркерів причинно-наслідкових зв'язків. На локальних рівнях характер впливу рельєфу на екологічні процеси може визначатися певною множинною процесів, склад яких та інтенсивність впливу яких можуть суттєво змінюватися в різних точках простору. Тим не менш, можна вважати фактом, що на регіональному рівні може бути

встановлений монотонний зв'язок між фітоіндикаційними оцінками екологічних режимів та геоморфологічними предикторами.

Для практичного застосування в цілях екстраполяції точкових оцінок екологічних факторів лінійна регресійна модель непридатна на регіональному рівні з приводу значної нестаціонарності варіювання досліджуваних величин та нелінійного характеру зв'язку екологічних режимів та рельєфних умов. Лінійна складова зв'язку тільки дуже в загальному вигляді відображає реальні відносини між досліджуваними величинами. Безспірною перевагою лінійної моделі є можливість її інтерпретувати. Але одержані інтерпретації досить поверхово показують зв'язки в системі клімат–рельєф–рослинний покрив. Лінійна регресія передбачає наявність функціонального зв'язку, відхилення від якого є випадковим в обидва напрямки від гіпотетичного прогнозованого значення функції відгуку. Але переважна більшість екологічних зв'язків підкоряється закону лімітуючого фактора, внаслідок чого відхилення від функціональної залежності є асиметричним: досліджувана змінна може бути менше / більше прогнозованого, але ніколи не більше / не менше. У випадку, коли з інших джерел відомо, що така залежність може бути описана гаусовою дзвоноподібною кривою, то для математичного описання залежності можна застосувати специфічні математичні процедури (тер Braak, 1986). У випадку асиметричної залежності можна застосувати β -функцію (Austin, 1976). Ці моделі придатні для описання залежності, але проблематичним є їх застосування для прогнозу та до екстраполяції. Більш гнучкою є регресійна модель за методом опорних векторів (Karatzoglou, 2004). Ця регресія здатна знаходити залежності, які досить добре описують складні за своєю природою взаємозв'язки, але, на відміну від лінійної моделі, опорні

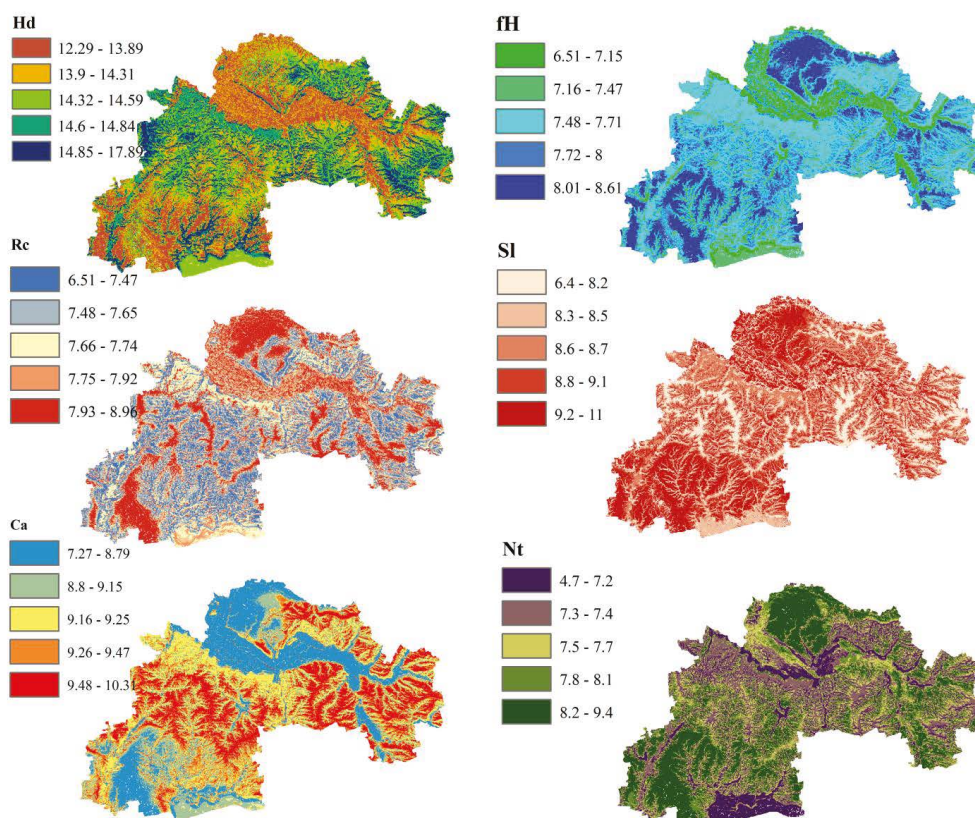


Рис. 5. Просторове варіювання фітоіндикаційних оцінок екологічних режимів у межах Дніпропетровської області
Умовні позначки: Hd – режим вологості едафотопу; fH – режим змінності вологості; Rc – режим кислотності; SI – режим трофності; Ca – вміст карбонатів у ґрунті; Nt – засвоювані форми азоту.

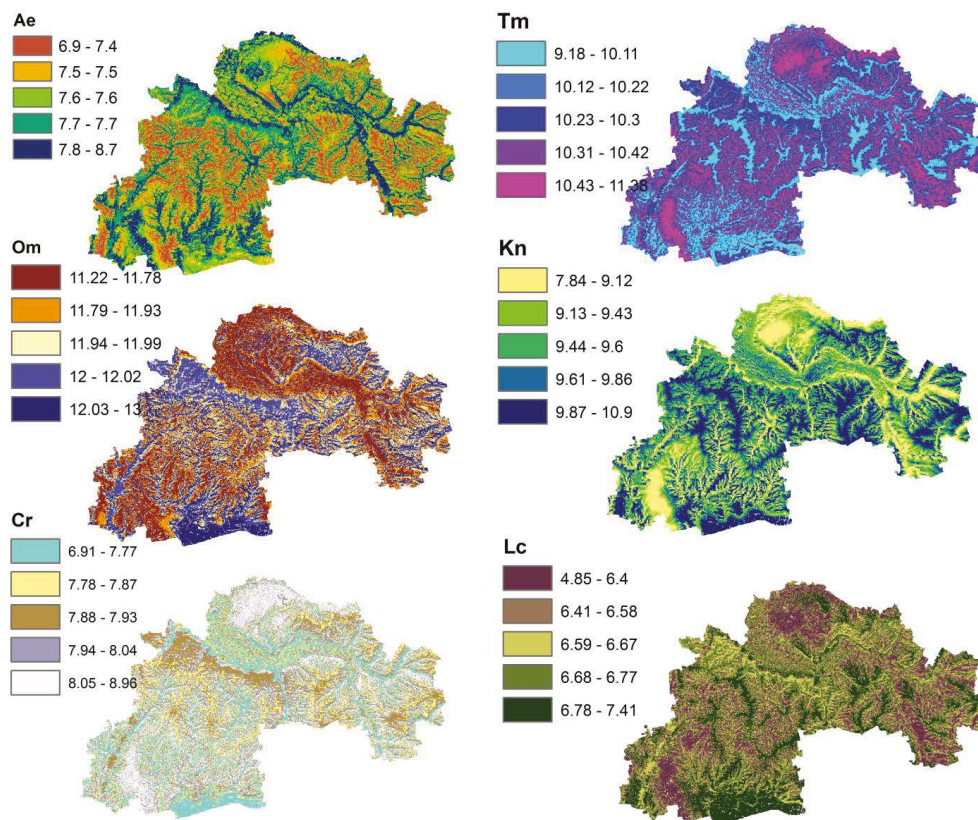


Рис. 6. Просторове варіювання фітоіндикаційних оцінок екологічних режимів у межах Дніпропетровської області
Умовні позначки: Ae – режим аерації; Tm – термоклімат; Om – омброклімат; Kn – континентальність; Cr – криоклімат; Lc – режим освітлення.

методи не можна застосовувати для інтерпретації одержаного результату. Одержані просторові моделі характеризуються високою мірою інформативності (рис. 5, 6).

Для вирішення завдань описання просторової варіації екологічних властивостей як предикторів застосовують зазвичай дві групи показників: цифрову модель рельєфу та її похідні, а також вегетаційні індекси, які одержані за допомогою даних дистанційного зондування поверхні Землі (Ließ et al., 2016). Такий підхід придатний для територій, де залишився природний або штучний натуралізований, рослинний покрив (Zhukov, Kunah, Taran, et al., 2016). У межах Дніпропетровської області значна частина території антропогенно трансформована (Zhukov et al., 2017). Моноценози, які формуються у межах сільськогосподарських полів, не можуть бути застосовані для проведення синфітоіндикації. Певний рівень різноманіття встановлений для рослинних угруповань електричних підстанцій. Ці угруповання поряд з фрагментарними угрупованнями природних екосистем можна застосовувати для фітоіндикації екологічних режимів. Але для цілей екстраполяції у межах регіону можуть бути застосовані тільки дані цифрової моделі рельєфу та її похідні, так як вегетаційні індекси також відображають явища антропогенної трансформації, які в складний спосіб пов'язані з динамікою екологічних процесів, але не можуть бути застосовані як змінні предиктори.

Висновки

Цифрова модель рельєфу та похідні від неї інформаційні шари просторових даних (топографічний індекс вологості, індекс топографічного положення, індекс балансу геомаси, фактор ерозії, геоморфологічні оцінки прямої та розсіяної

інсоляції, висота над русловою мережею, векторна міра пересіченості місцевості та різноманіття форм рельєфу за Шенноном) є інформаційно-цінними коваріатами (предикторами) екологічних режимів, які оцінені за допомогою методу синфітоіндикації. Процедура просторової екстраполяції фітоіндикаційних оцінок на регіональному рівні може бути виконана на основі регресійних моделей за методом опорних векторів. Такий підхід є гнучким і враховує специфіку екологічних взаємодій у системі рельєф–рослинний покрив–екологічні режими.

References

- Andrushenko, A. Y., & Zhukov, A. V. (2016). Masshtabno-zavisimye jeffekty v strukture jekologicheskoy nishi lebedja-shipuna Cygnusolor (Gmelin, 1803) v period zimovki v predelah zaliva Sivash [Scale-dependent effects in structure of the wintering ecological niche of the mute swan during wintering in the gulf of Sivash]. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University*, 6(3), 234–247 (in Russian). doi: [10.15421/201691](https://doi.org/10.15421/201691)
- Austin, M. P. (1976). Non-linear species response models in ordination. *Vegetatio*, 33, 33–41.
- Baljuk, J. A., Kunah, O.N., Zhukov, A. V., Zadorozhnaja, G. A., & Ganzha, D. S., (2014). Adaptivnaja strategija otbora prob dlja ocenki prostranstvennoj organizacii soobshhestv pochvennyh zhivotnyh urbanizirovannyh territorij na razlichnyh ierarhicheskikh urovnjah [Sampling adaptive strategy and spatial organisation estimation of soil animal communities at various hierarchical levels of urbanised territories]. *Biological Bulletin*. 4(3), 8–33 (in Russian). doi: [10.7905/bbmspu.v4i3.892](https://doi.org/10.7905/bbmspu.v4i3.892)

- Beven, K., & Kirkby, N. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43–69. doi: [10.1080/02626667909491834](https://doi.org/10.1080/02626667909491834)
- Bock, M., & Köthe, R. (2008). Predicting the Depth of hydrologic Soil Characteristics. *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, 19, 13–22.
- Boehner, J., & Antonic, O. (2009). Land Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* (195–226). Elsevier Science. doi: [10.1016/s0166-2481\(08\)x0001-7](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)x0001-7)
- Buzuk, G. N. (2017). Phytoindication with ecological scales and regression analysis: environmental index. *Bulletin of Pharmacy*, 2 (76), 31–37.
- Chi, B. L., Bing, C. S., Walley, F., & Yates, T. (2009). Topographic indices and yield variability in a rolling landscape of western Canada. *Pedosphere*, 19(3), 362–370. doi: [10.1016/s1002-0160\(09\)60127-2](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(09)60127-2)
- Ciha, A. J. (1984). Slope position and grain yield of soft white winter wheat. *Agronomy Journal*, 76, 193–196. doi: [10.2134/agronj1984.00021962007600020006x](https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020006x)
- Cox, M. S., Gerard, P. D., & Abshire, M. J. (2006). Selected soil properties' variability and their relationships with yield in three Mississippi fields. *Soil Science Society of America Journal*, 171, 541–551. doi: [10.2136/sssaj2003.1296](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1296)
- Dehn, M., Gärtner, H., & Dikau, R. (2001). Principles of semantic modeling of landform structures. *Computers and Geoscience*, 27(8), 1005–1010. doi: [10.1016/s0098-3004\(00\)00138-2](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(00)00138-2)
- Didukh, Y. P. (2011). The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Phytosociocentre, Kyiv.
- Green, T. R., & Erskine, R. H. (2004). Measurement, scaling, and topographic analyses of spatial crop yield and soil water content. *Hydrological Processes*, 18(8), 1447–1465. doi: [10.1002/hyp.1422](https://doi.org/10.1002/hyp.1422)
- Guisan, A., Weiss, S. B., & Weiss, A. D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143, 107–122. doi: [10.1023/A:1009841519580](https://doi.org/10.1023/A:1009841519580)
- Halvorson, G. A., & Doll, E. C. (1991). Topographic effects on spring wheat yield and water use. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1680–1685. doi: [10.2136/sssaj1991.03615995005500060030x](https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500060030x)
- Iwahashi, J., & Pike, R. J. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86, 409–440. doi: [10.1016/j.geomorph.2006.09.012](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012)
- Karatzoglou, A., Smola, A., Hornik, K., & Zeileis, A. (2004). Kernlab – An S4 Package for Kernel Methods in R. *Journal of Statistical Software*, 11(9), 1–20. doi: [10.18637/jss.v011.i09](https://doi.org/10.18637/jss.v011.i09)
- Kaspar, T. C., Pulido, D. J., Fenton, T. E., Colvin, T. S., Karlen, D. L., Jaynes, D. B. & Meek, D. W. (2004). Relationships of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agronomy Journal*, 96, 700–709.
- Kravchenko, A. N., & Bullock, D. G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy journal*, 92, 75–83. doi: [10.2134/agronj2000.92175x](https://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x)
- Kunah, O. M., & Papka, O. S. (2016a). Ekogeografichni determinanty ekologichnoi' nishi vatochnyka syrijs'kogo (*Asclepias syriaca*) na osnovi indeksiv znimkiv dystancijnogo zonduvannya Zemli [Ecogeographical determinants of the ecological niche of the common milkweed (*Asclepias syriaca*) on the basis of indices of remote sensing of land images]. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 24(1), 78–86 (in Ukrainian). doi: [10.15421/011609](https://doi.org/10.15421/011609)
- Kunah, O. M., & Papka, O. S. (2016b). Geomorfologichni ekogeografichni zmynni, jaki vyznachajut' osoblyvosti ekologichnoi' nishi vatochnyka syrijs'kogo (*Asclepias syriaca* L.) [Geomorphological ecogeographical variables defining features of ecological niche of common milkweed (*Asclepias syriaca* L.)]. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*, 1, 243–275 (in Ukrainian). doi: [10.15421/201614](https://doi.org/10.15421/201614)
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2006). *HydroSHEDS Technical Documentation*. World Wildlife Fund US, Washington, DC.
- Ließ, M., Schmidt, J., & Glaser, B. (2016). Improving the Spatial Prediction of Soil Organic Carbon Stocks in a Complex Tropical Mountain Landscape by Methodological Specifications in Machine Learning Approaches. *PLoS ONE*, 11(4). e0153673. doi: [10.1371/journal.pone.0153673](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153673)
- Marques da Silva, J. R., & Silva, L. L. (2006). Evaluation of maize yield spatial variability based on field flow density. *Biosystems Engineering*, 95, 339–347. doi: [10.1016/j.biosystemseng.2006.06.015](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.06.015)
- McBratney, A. B., Mendonca-Santos, M. L., Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117 (1–2), 3–52.
- McCool, D. K., Renard, K. G., & Foster, G. R. (1994). The Revised Universal Soil Loss Equation. *Proceedings of an International Workshop on Soil Erosion*. The Center for Technology Transfer and Pollution Prevention, Purdue University. West Lafayette, IN, USA.
- Miao, Y. X., Mulla, D. J., & Robert, P. C. (2006). Identifying important factors influencing corn yield and grain quality variability using artificial neural networks. *Precision Agriculture*, 7, 117–135. doi: [10.1007/s11119-006-9004-y](https://doi.org/10.1007/s11119-006-9004-y)
- Moeller, M., Volk, M., Friedrich, K., & Lymburner, L. (2008). Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 419–430. doi: [10.1002/jpln.200625039](https://doi.org/10.1002/jpln.200625039)
- Moore, I. D., Nortin, T. W., & Williams, J. E. (1993). Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes. *Journal of Hydrology*, 150(2–4), 717–747. doi: [10.1016/0022-1694\(93\)90133-t](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90133-t)
- Moore, I., Gessler, P., Nielsen, G., & Peterson, G. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 443–452. doi: [10.2136/sssaj1993.572NPb](https://doi.org/10.2136/sssaj1993.572NPb)
- Olaya, V., & Conrad, O. (2008). *Geomorphometry in SAGA*. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science. doi: [10.1016/s0166-2481\(08\)x0001-7](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)x0001-7)
- Orlanski, J. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56, 527–530.
- Potapenko, O. V. (2016). Ocinka ekologichnyh rezhytiv u mezhah terytorij elektrychnykh pidstancij metodamy fitoindykacii' [Assessment of environmental conditions within the boundaries of electric substations methods phytoindication]. *News of Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University*, 4(42), 133–139 (in Ukrainian).
- Potapenko, O. V. (2018). Ocenka fitocenoticheskogo raznoobrazija terytorij jelektricheskikh podstancij [Assessment of phytoecoenological diversity of electrical substations territories]. *Acta Biologica Sibirica*, 4(3), 6–35 (in Russian). doi: [10.14258/abs.v4i3.4365](https://doi.org/10.14258/abs.v4i3.4365)
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.R-project.org/>
- Sappington, J. M., Longshore, K. M., & Thompson, D. B. (2007). Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using desert bighorn sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management*, 71(5), 1419–1426. doi: [10.2193/2005-723](https://doi.org/10.2193/2005-723)
- Simmons, F. W., Cassel, D. K. & Daniels, R. B. (1989). Landscape and soil property effects on corn grain yield response to tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 534–539. doi: [10.2136/sssaj1989.03615995005300020038x](https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020038x)

- ter Braak, C. J. F. (1986). Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167–1179. doi: [10.2307/1938672](https://doi.org/10.2307/1938672)
- Timlin, D., Pachepsky, Y., Snyder, V. A., & Bryant, R. B. (1998). Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 764–773. doi: [10.2136/sssaj1998.03615995006200030032x](https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200030032x)
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. *Agricultural handbook*. Washington, 537–565.
- Zeheke, T. B., & Si, B. C. (2004). Scaling properties of topographic indices and crop yield: Multifractal and joint multifractal approaches. *Agronomy Journal*, 96(4), 1082–1090. doi: [10.2134/agronj2004.1082](https://doi.org/10.2134/agronj2004.1082)
- Zhukov, A. V., & Andryushchenko, A. Y. (2017). Rol' rel'efa v organizacii jekologicheskoy nishi lebedja-shipuna (*Cygnus olor* (Gmelin, 1803)) na zimovke v Prisivash'e [Relief and ecological niche of mute swan (*Cygnus olor* (Gmelin, 1803)) wintering in Sivash]. *Acta Biologica Sibirica*, 3(2), 20–45 (in Russian). doi: [10.14258/abs.v3i2.2730](https://doi.org/10.14258/abs.v3i2.2730)
- Zhukov, A. V., & Zadorozhnaya, G. A. (2016). Prostranstvenno-vremennaja dinamika tverdosti rekul'tivirovannyh pochv, sformirovannyh v rezul'tate dobychi poleznyh iskopaemyh otkrytym sposobom [Spatio-temporal dynamics of the penetration resistance of recultivated soils formed after open cast mining]. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 24(2), 324–331 (in Russian). doi: [10.15421/011642](https://doi.org/10.15421/011642)
- Zhukov, A. V., Kunah, O. N., Novikova, V. A., & Ganzha, D. S. (2016). Fitoindikacionnoe ocenivanie kateny soobshhestv pochvennoj mezofauny i ih jekomorficheskaja organizacija [Phytoindication estimation of soil mesopedobionts communities catena and their ecomorphic organization]. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 6(3), 91–117 (in Russian). doi: [10.15421/201676](https://doi.org/10.15421/201676)
- Zhukov, A. V., Sirovatko, V. O., & Ponomarenko, N. O. (2017). Dynamika rozmiriv sil's'kogospodars'kyh polivjak funkcija i'h rozmiriv ta formy [Spatial dynamic of the agriculture fields towards their shape and size]. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(3), 14–31 (in Ukrainian). doi: [10.15421/2017_45](https://doi.org/10.15421/2017_45)
- Zhukov, O. V., & Potapenko, O. V. (2017). Fitoindykacija ekologichnyh umov u mezhah terytorij elektrychnyh pidstancij [Environmental impact assessment of distribution substations: the case of phytoindication]. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(1), 5–21 (in Ukrainian). doi: [10.15421/201701](https://doi.org/10.15421/201701)
- Zhukov, O. V., Kunah, O. M., Taran, V. O., & Lebedinska, M. M. (2016). Prostorova variabel'nist' elektroprovodnosti g'runtiv areny dolyny r. Dnipro (u mezhah pryrodnogo zapovidnyku "Dniprovs'ko-Oril's'kyj") [Spatial variability of soils electrical conductivity within arena of the river dnepr valley (territory of the natural reserve "Dniprovs'ko-Oril's'kyj")]. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 6(2), 129–157 (in Ukrainian). doi: [10.15421/201646](https://doi.org/10.15421/201646)